

УДК 539.30; 681.586.326; 62–278
DOI: 10.15587/1729-4061.2019.156959

Розроблення та дослідження методу вимірювання нестационарного тиску з застосуванням вейвлет перетворення

М. О. Тихан, Т. М. Репетило, С. М. Ключковський, О. М. Маркіна

У системах автоматичного керування існує нагальна потреба вимірювання швидкозмінних нестационарних фізичних величин у реальному, чи близько до цього, часі. В цій галузі окремою групою вирізняються задачі вимірювання нестационарного тиску рідин чи газів.

Показується, що вимірювання нестационарного тиску у реальному, чи близько до цього, часі представляє собою задачу відновлення вхідного сигналу, яка з погляду математики відноситься до класу некоректно поставлених проблем (згідно Ж.Адамара). Отримано розв'язок оберненої задачі вимірювання, що базується на математичній моделі вимірювального перетворення, яке здійснює сенсор тиску. На основі цього розв'язку побудований метод вимірювання, що передбачає вейвлет опрацювання вихідного сигналу сенсора. При цьому в якості базисних функцій вейвлет перетворення запропоновано обирати такі, які є модифікацією імпульсної перехідної функції сенсора.

Подається експериментальне дослідження дієздатності розробленого методу, яке базується на вимірюванні імітованого імпульсу тиску. Імпульс тиску імітується падінням кульки з каліброваною масою на мембрану сенсора. Запропонована вимірювальна схема, для визначення тривалості торкання кульки до мембрани. Перевірка точності методу полягає на порівнянні реальної маси кульки з визначеною за вихідним сигналом сенсора. Запропонований метод показав високу точність, оскільки максимальна відносна похибка визначення маси падаючої кульки становила лише 0,65 %.

Запропонований метод вимірювання нестационарного тиску може бути використаний в системах керування в яких необхідне швидкодіюче коригування динамічної похибки вимірювання. Серед інших це системи керування в аерокосмічній техніці, випробувальних комплексах, військовій техніці, наукових дослідженнях

Ключові слова: вимірювання нестационарного тиску, обернена задача вимірювання, реальночасовий метод вимірювання, вейвлет перетворення

1. Вступ

На сьогодні у численних високотехнологічних системах автоматичного керування існує нагальна потреба вимірювання швидкозмінних нестационарних фізичних величин у реальному, чи близько до цього, часі. Серед цих задач окремою групою вирізняються задачі вимірювання нестационарних механічних величин, зокрема тиску рідин чи газів. Такі задачі особливо актуальні в аерокосмічній техніці, випробувальних комплексах, військовій техніці, наукових дослідженнях [1–4].

Однак вимірювання нестационарного тиску у реальному часі представляє собою задачу відновлення вхідного сигналу, яка з погляду математики відноситься до класу некоректно поставлених проблем (згідно Ж.Адамара) [5]. Загалом існують методи розв'язку некоректних задач [6, 7], чи методи коригування динамічної похибки вимірювання [8, 9]. Проте для вимірювання у реальному часі, чи близько до цього, ці методи непридатні, оскільки потребують неприпустимо значних затрат часу, або ж недостатньо точні.

Тому розроблення точних і швидкодіючих реальногочасових методів вимірювання нестационарного тиску є актуальною проблемою.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Вимірювання нестационарного тиску представляє собою специфічну проблему особливо якщо це швидкоплинний процес, а вимірювання має бути реальногочасовим. Відомі на сьогодні методи вимірювання нестационарного тиску можна об'єднати у дві групи, а саме: апаратні методи (методи з застосуванням спеціальних сенсорів), методи зі спеціальним опрацюванням вихідного сигналу (застосування фільтрації, застосуванням декомпозиції сигналу сенсора тощо). Так, існує метод вимірювання нестационарного тиску, який полягає на використанні спеціального сенсора [10], що містить у своїй конструкції акселерометр, який розташований на мембрані і вимірює її прискорення. Суттєвим недоліком такого методу є необхідність дуже точної синхронізації роботи каналів вимірювання деформації мембрани сенсора і вимірювання її прискорення за допомогою акселерометра. Крім цього, такий суміщений сенсор має складне метрологічне забезпечення, а також потребує спеціальних засобів отримання метрологічних характеристик, особливо динамічних. Також, при експлуатації сенсор потребуватиме строгого позиціонування для запобігання паразитних складових при бокових коливаннях маси акселерометра. Описані недоліки є причиною низької точності методу, що унеможлиблює його застосування у високотехнологічних системах курування

У [11] для вимірювання швидкозмінного тиску пропонується використання пьезоелектричного сенсора тиску. Справді, пьезоелектричні сенсори, маючи високу частоту власних коливань, придатні для вимірювання швидкозмінного імпульсного тиску, однак непридатні для вимірювання тиску, що має статичні чи повільнозмінні ділянки. А таке повсюдно зустрічається у нестационарних процесах. Тому залишається актуальним розроблення методу вимірювання, який можна використовувати при довільній нестационарності вимірювального тиску.

Відомий метод вимірювання нестационарного тиску [12], який базується на змішаному алгоритмі з застосуванням вейвлет перетворення і варіаційної декомпозиції. Головним недоліком цього методу є істотна тривалість процедури опрацювання сигналу і невисока точність, оскільки не передбачає процедури відновлення вхідного сигналу, а лише його «очищення» від шумів. Тому проблема вимірювання нестационарного тиску у реальному, чи близько до цього, часі залишається актуальною.

Відомий метод опрацювання нестационарного сигналу [13], який базується на застосуванні вейвлет перетворення. Проте цей метод, як і попередній, зоріє-

нтований на «очищення» сигналу від шумів і не визначена його точність при вимірювальній процедурі. Саме ці недоліки не дозволяють використати цей метод для вимірювальних процедур, особливо реальних часових.

На сьогодні мають також застосування методи опрацювання сигналів з застосуванням фільтра Калмана [14, 15]. При цьому, реалізація процедури йде в темпі вимірювання і не вимагається стаціонарності вимірюваного сигналу. Але при реалізації фільтра Калмана, той може зазнавати розбіжності внаслідок неточності вихідних даних. Ця ситуація робить неможливим використання методів, що неприпустиме при реальних вимірюваннях в швидкодіючих системах автоматики.

Загалом очевидно, що недоліки існуючих методів вимірювання не дозволяють їх застосування у прецизійних швидкодіючих системах, а тому необхідно розробляти нові, більш ефективні методи.

3. Ціль та задачі дослідження

Метою роботи є розроблення швидкодіючого методу вимірювання нестаціонарного тиску.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- дослідити коректність задачі вимірювання нестаціонарного тиску;
- розв’язати обернену задачу вимірювання;
- дослідити можливість застосування вейвлет перетворення вихідного сигналу сенсора для оберненої задачі вимірювання;
- перевірити дієздатність методу вимірювання при вимірюванні імітованого імпульсу тиску.

4. Теоретичні аспекти методу вимірювання

4. 1. Вимірювання нестаціонарного тиску як некоректно поставлена задача

При вимірюванні нестаціонарного тиску найчастіше використовують пьезорезистивні чи тензорезистивні сенсори [1–4, 16–19]. Перетворюючу функцію таких сенсорів можна подати у вигляді інтегралу згортки

$$U(t) = k \int_0^t p(\tau) \cdot e^{-\beta(t-\tau)} \cdot \sin(\eta(t-\tau)) d\tau, \quad (1)$$

де $U(t)$ – вихідний сигнал сенсора, k – статичний коефіцієнт перетворення сенсора, $p(t)$ – вимірюваний тиск, η і β – частота власних коливань і коефіцієнт демпфування коливань механічної частини сенсора.

Таким чином, при вимірюванні ми спостерігаємо сигнал $U(t)$, і за цим сигналом нам необхідно знайти яким же було значення тиску $p(t)$. З погляду математики це означає розв’язати рівняння (1). Покажемо, що при вимірюваннях це може бути некоректною процедурою.

Запишемо рівняння (1) у такому вигляді

$$U(t) = k \int_0^t g(t-\tau) p(\tau) d\tau, \quad (2)$$

де $g(t-\tau) = e^{-\beta(t-\tau)} \sin(\eta(t-\tau))$ – імпульсна перехідна функція сенсора.

Рівняння (2) є інтегральним рівнянням Вольтерра з симетричним ядром у класі $L_2[0, t]$.

Задамося функцією

$$p_i(\tau) = p(\tau) + \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \psi_i(\tau), \quad (3)$$

де $p(\tau)$ – розв'язок рівняння (2), або ж істинне значення вимірюваного тиску, α_i – довільні сталі, а деякі функції, що не рівні нулю майже всюди, а також $\psi_1(\tau) \dots \psi_n(\tau)$

$$\int_0^t g(t-\tau) \psi_i(\tau) d\tau = 0; \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

Підставимо (3) у рівняння (2) отримаємо

$$\begin{aligned} \int_0^t g(t-\tau) \left[p(\tau) + \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \psi_i(\tau) \right] d\tau &= \int_0^t g(t-\tau) p(\tau) d\tau + \\ + \int_0^t g(t-\tau) \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \psi_i(\tau) d\tau &= \\ = \int_0^t g(t-\tau) p(\tau) d\tau + \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \int_0^t g(t-\tau) \psi_i(\tau) d\tau. \end{aligned} \quad (5)$$

У виразі (5) другий доданок в силу прийнятого припущення (4) дорівнює нулю, а тому весь вираз (5) дорівнює $U(t)$. Тобто $p_i(\tau)$ також можна трактувати як розв'язок рівняння (2), тобто як значення вимірюваного тиску. А це означає, що вхідний сигнал можна подати безліччю комбінацій істинного і сторонніх складових, котре дасть один і той самий вихідний сигнал, який спостерігається при вимірюванні.

Тому, якщо різницю

$$p_i(\tau) - p(\tau) = \Delta(\tau),$$

можна подати у вигляді ряду $\sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \psi_i(\tau)$, то за отриманим реальним вихідним сигналом, вхідний сигнал (мета вимірювання) визначатиметься неоднозначно, а отже вимірювання будуть некоректними.

З іншого боку, у відповідності до теореми Бореля про згортку [20], рівняння (2) за допомогою перетворення Фур'є можна подати таким чином

$$H(\omega) \cdot P(\omega) = U(\omega), \quad (6)$$

де $U(\omega)$, $H(\omega)$, $P(\omega)$ – Фур'є образи функцій $U(t)$, $g(t-\tau)$, $p(\tau)$, тобто спектр вихідного сигналу, передавальна функція сенсора і спектр вхідного сигналу відповідно. Тому, за допомогою зворотнього перетворення Фур'є розв'язок рівняння (2) буде

$$p(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{U(\omega)}{H(\omega)} \exp(jt\omega) d\omega. \quad (7)$$

Проте функція $H(\omega)$ може дорівнювати нулю в деяких точках $\omega = \omega_i$, або виявитись фінітною і поза деяким інтервалом $\omega_1 \leq \omega \leq \omega_2$ бути тотожною нулю $H(\omega) \equiv 0$.

Тоді розв'язок (2) можна отримати як з функції

$$P(\omega) = U(\omega) / H(\omega); \quad \omega \neq \omega_i, \quad (8)$$

так і з функції

$$P_1(\omega) = P(\omega) + \sum_i a_i \cdot \delta(\omega - \omega_i), \quad (9)$$

а шуканий вхідний сигнал $p(t)$ становитиме

$$p(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{U(\omega)}{H(\omega)} \exp(jt\omega) d\omega + \frac{1}{2\pi} \sum_i a_i \cdot \exp(jt\omega_i), \quad (10)$$

де a_i – довільні сталі.

Таким чином, рівняння (2) не матиме єдиного розв'язку, якщо Фур'є образ передавальної функції сенсора $H(\omega)$ є фінітним, або ж в деяких точках перетворюється в нуль. Тому, якщо спектр вхідного сигналу $P(\omega)$ має гармоніки з частотами, що співпадають з нулями передавальної функції $H(\omega)$, то ці гармоніки не впливають на вихідний сигнал $U(t)$ і, відповідно, не можуть бути однозначно відновлені з нього. Оскільки передавальні функції реальних сенсорів тиску практично завжди мають нулі, а довжина спектра вхідного сигналу в силу його

нестационарності може бути доволі широкою, то з цього погляду вимірювання будуть некоректними.

Загалом очевидно те, що спроба відновити вхідний сигнал при вимірюванні нестационарного тиску може виявитись некоректною процедурою, що потребує спеціальних методів її розв'язання.

4. 2. Розв'язок оберненої задачі вимірювання та вейвлет перетворення вихідного вихідного сенсора

Для розв'язку оберненої задачі вимірювання здійснимо подвійне диференціювання рівняння (1), отримаємо

$$\frac{dU(t)}{dt} = U'(t) = -\beta U(t) + k \int_0^t \eta \cdot e^{-\beta(t-\tau)} p(\tau) \cos(\eta(t-\tau)) d\tau; \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2U(t)}{d^2t} = U''(t) = & -\beta \cdot U(t) + k \cdot \eta \cdot p(t) - \\ & -k \cdot \int_0^t \left[\eta \beta \cdot e^{-\beta(t-\tau)} p(\tau) \cos(\eta(t-\tau)) + \right. \\ & \left. + \eta^2 e^{-\beta(t-\tau)} p(\tau) \sin(\eta(t-\tau)) \right] d\tau. \end{aligned} \quad (12)$$

Беручи до уваги (1) і (11), маємо

$$U''(t) = -2 \cdot \beta \cdot U'(t) + k \cdot \eta \cdot p(t) - (\eta^2 + \beta^2) \cdot U(t).$$

З останнього рівняння отримуємо

$$p(t) = \frac{U''(t) + 2 \cdot \beta \cdot U'(t) + (\eta^2 + \beta^2) \cdot U(t)}{k \cdot \eta}. \quad (13)$$

Рівняння (13) є розв'язком оберненої задачі вимірювання нестационарного тиску і базою для розроблення методу вимірювання.

Зауважимо, що реальний вихідний сигнал отримується з деякою похибкою, тому його безпосереднє диференціювання буде некоректною процедурою.

Застосуємо до вихідного сигналу $U(t)$ пряме дискретне вейвлет перетворення [21, 22]

$$C_u(n, m) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} U(t) a^{-m/2} \psi(a^{-m}t - n) dt, \quad (14)$$

де $m, n \in \mathbb{Z}$, \mathbb{Z} – множина дійсних чисел, a – параметр масштабу; $\psi(a^{-m}t - n)$ – базисна функція.

Своєю чергою, зворотнє дискретне вейвлет перетворення здійснюється за формулою

$$\tilde{U}(t) = K_{\psi} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} C_u(m, n) a^{-m/2} \psi(a^{-m}t - n) dt, \quad (15)$$

де K_{ψ} – константа, яка визначається базисною функцією ψ .

Тоді, похідні сигналу (15) будуть

$$\frac{d\tilde{U}(t)}{dt} = \tilde{U}'(t) = K_{\psi} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} C_u(m, n) a^{-m/2} \frac{d\psi(a^{-m}t - n)dt}{dt}, \quad (16)$$

$$\frac{d^2\tilde{U}(t)}{dt^2} = \tilde{U}''(t) = K_{\psi} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} C_u(m, n) a^{-m/2} \frac{d^2(\psi(a^{-m}t - n)dt)}{dt^2}. \quad (17)$$

Тобто, диференціювання сигналу отриманого через вейвлет перетворення зводиться до диференційованості базисної функції і таке диференціювання є стійким, оскільки базисна функція задається аналітично. Зауважимо, що при диференціюванні Фур'є рядів отримуються ряди з непридатно повільною збіжністю.

Однак фундаментальною проблемою при вейвлет перетворенні сигналів є вибір базисної функції [23]. Саме раціональний вибір такої функції визначає точність і швидкість перетворення. А при вимірюванні у реальному часі ці параметри є визначальними. Тому для вейвлет перетворення вимірювальних сигналів пропонується базисну функцію визначати виходячи з фізичної сутності вимірювання. При вимірюванні нестационарного тиску вихідний сигнал сенсора можна подати як інтеграл добутку вхідного сигналу та імпульсної перехідної функції. Тому логічно припустити, що базисною функцією для вейвлет перетворення вихідного сигналу найкраще служитиме функція, близька до імпульсної перехідної функції сенсора.

У рівнянні (1) вираз $g(t-\tau) = e^{-\beta(t-\tau)} \sin(\eta(t-\tau))$ є імпульсною перехідною функцією. Сама по собі імпульсна перехідна функція не є вейвлетом оскільки

$$\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\beta(t-\tau)} \cdot \sin(\eta(t-\tau)) \neq 0.$$

Проте, якщо імпульсну перехідну функцію центросиметрично відобразити у 3-й квадрант, то отримаємо модифіковану функцію $\hat{g}(t)$ (рис. 1).

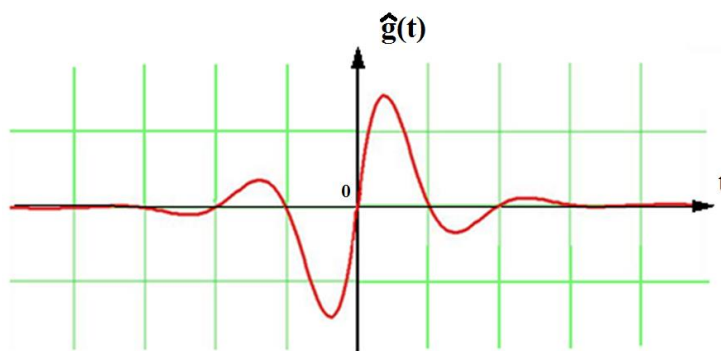


Рис. 1. Модифікована імпульсна перехідна функція сенсора тиску

Модифікована імпульсна перехідна функція вже буде вейвлетом оскільки $\int_{-\infty}^{+\infty} \hat{g}(\tau) d\tau = 0$, а ядро інтегрального рівняння Вольтерра, яким є імпульсна перехідна функція, належить до класу $L_2[0, t]$ (множина функцій інтегрованих в квадраті на $[a, b]$). Тобто $\int_{-\infty}^{+\infty} [\hat{g}(t)]^2 dt < \infty$.

5. Практична реалізація та дослідження методу вимірювання

На підставі отриманих теоретичних аспектів метод вимірювання нестационарного тиску зі застосуванням вейвлет перетворення є таким:

- вихідний сигнал сенсора $U(t)$ піддаємо прямому і зворотньому вейвлет перетворенню за формулами (14) і (15);
- отриманий в результаті вейвлет опрацювання сигнал $\tilde{U}(t)$ піддаємо подвійному диференціюванню за формулами (16) і (17);
- визначаємо значення вимірюваного тиску за формулою

$$p(t) = \frac{\tilde{U}''(t) + 2 \cdot \beta \cdot \tilde{U}'(t) + (\eta^2 + \beta^2) \cdot \tilde{U}(t)}{k \cdot \eta}. \quad (18)$$

Зауважимо, що отримання першої і другої похідної вейвлет опрацьованого вихідного сигналу можна здійснювати паралельно.

5. 1. Експериментальна перевірка розробленого методу вимірювання

Для перевірки працездатності методу використовувався тензорезистивний сенсор (рис. 2), а тестовий сигнал створювався силовим імітатором імпульсного тиску. Тобто, динамічний сигнал у вигляді короткого імпульсу створювався ударом по мембрані металевої кульки з масою m , що вільно падає з висоти H .



Рис. 2. Тензорезистивний сенсор, що використовувався для перевірки працездатності методу

Дослідна установка (рис. 3) складається з затискача 1, у якому строго вертикально закріплений дослідний сенсор 2 мембраною вверх, спрямовуючої трубки 3, 4-модуля інтерфейсного E14-140 для опрацювання даних і передачі їх на монітор 5.



Рис. 3. Установка силовой имитации импульсного тиска

Спрямовуюча трубка довжиною 25 см. накручена на різьбову ділянку мембранної частини сенсора. У верхній частині спрямовуючої трубки розташований електромагніт, котрий утримує кульку масою 2г і при потребі звільняє її для вільного падіння на мембрану.

При використанні силового імітатора імпульсного тиску процедура перевірки працездатності розробленого методу вимірювання нестаціонарного тиску полягає у встановленні значення маси падаючої кульки і порівнянні цього значення з дійсним.

Для з'ясування дійсної тривалості контакту кульки з мембраною під час удару, кулька через гнучкий електропровід була задіяна в спеціальну схему (рис. 4), сигнали з якої фіксувалися системою відліку часу інтерфейсного модуля. Як тільки кулька торкалась мембрани утворювалась лінія зв'язку і електричний сигнал від джерела живлення реєструвався системою відліку часу. Як тільки кулька відскочила від мембрани лінія зв'язку розривалась, сигнал пропадав (наступні удари кульки по мембрані до уваги не брались). Тривалість такого сигналу дорівнювала часу контакту кульки з мембраною. У даному експерименті тривалість контакту склала $t_1 = 8 \times 10^{-5}$ с. Оскільки власна частота сенсора складала 1 кГц, то удар кульки об мембрану коректно інтерпретувати як короткий прямокутний імпульс [24].

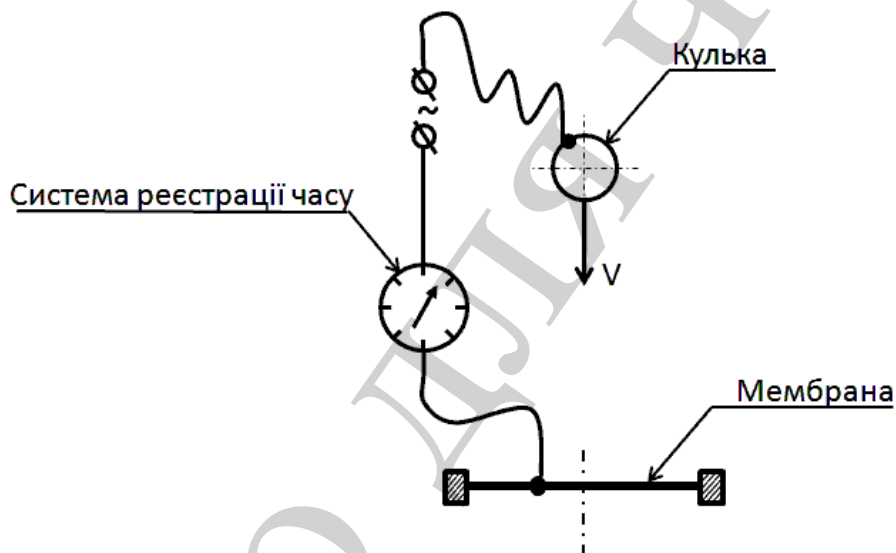


Рис. 4. Схема пристосування для визначення тривалості контакту кульки з мембраною

Така методика є непрямым способом вимірювання. Кулька, яка вільно падає з висоти H імітує імпульс тиску з амплітудою

$$p = \frac{4}{\pi R^2} \frac{m \sqrt{2gH}}{t_1}. \quad (19)$$

Якщо за вихідним сигналом сенсора відновити вхідний, то маса кульки, яка зімітувала такий імпульс тиску становить

$$m = \frac{p \pi R^2 t_1}{4 \sqrt{2gH}}. \quad (20)$$

Значення амплітуди імітованого імпульсу тиску p отримуємо в процесі реалізації методу вимірювання за формулою (18). А далі, використовуючи (20) отримуємо значення маси кульки m .

В результаті дослідження вихідний сигнал сенсора при падінні на його мембрану кульки мав вигляд (рис. 5), а відновлений сигнал імітованого тиску поданий на рис. 6.

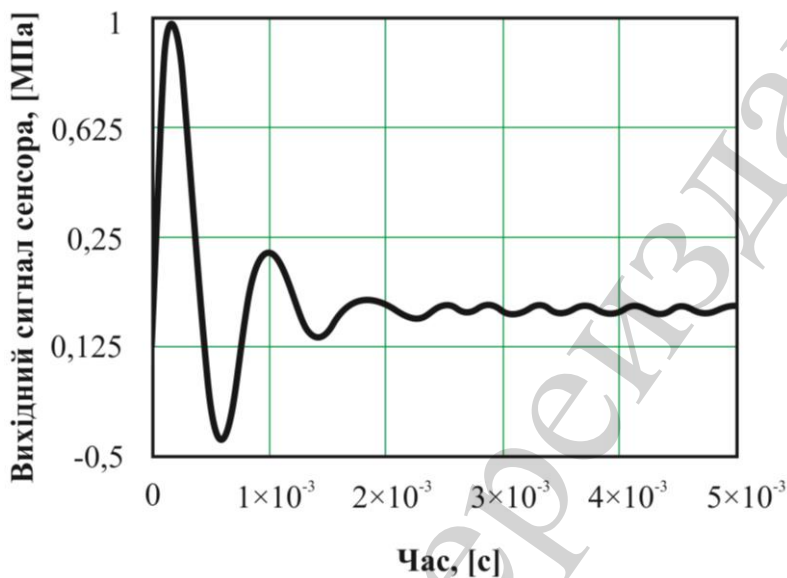


Рис. 5. Вихідний сигнал сенсора при падінні на його мембрану кульки

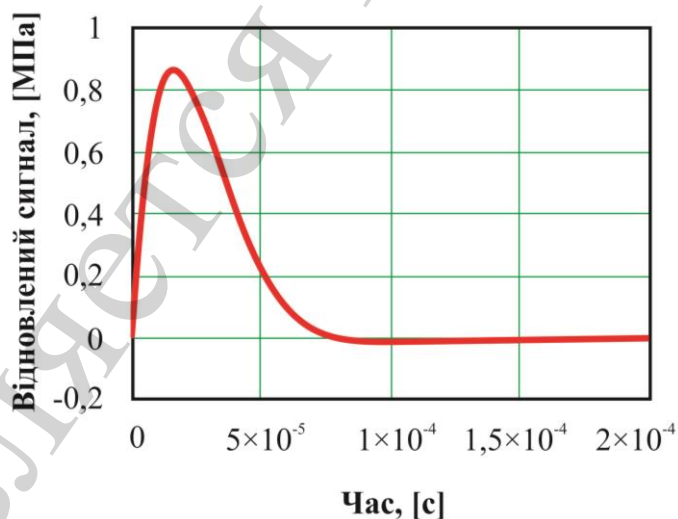


Рис. 6. Відновлений вхідний сигнал імітованого імпульсу тиску

За результатами 10-ти кратного випробування амплітуда імпульсу імітованого тиску становила 0,864 МПА. Оскільки тривалість імпульсу t_1 становила 8×10^{-5} с, тому маса падаючої кульки становила $m=1,987$ г. Таким чином, максимальна відносна похибка визначення маси падаючої кульки становила 0,65 %.

6. Аналіз розробленого методу вимірювання

Розроблений метод вимірювання, базуючись на використанні отриманого розв'язку оберненої задачі (13), передбачає отримання похідних вихідного сигналу $\dot{U}(t)$ і $\ddot{U}(t)$. Ці величини отримуються шляхом числового диференціювання вейвлет образу сигналу $\tilde{U}(t)$.

Виходячи з сутності числового інтегрування, можемо записати, що в момент часу t_i (де $i = 1 \dots N$)

$$p(t_i) = \frac{\ddot{U}(t_i) + 2 \cdot \beta \cdot \Delta t (\ddot{U}(t_{i-1}) + \ddot{U}(t_i) / 2) + (\eta_0^2 + \beta^2) \cdot U(t_i)}{k \cdot \eta_0}. \quad (21)$$

Отже, для обчислення значення вимірюваного тиску за (21) необхідно мати значення величин $U(t)$ і $\ddot{U}(t)$ у поточний момент часу t_i і значення величини $\ddot{U}(t)$ у попередній момент часу t_{i-1} .

У розробленому методі вимірювання сигнал $\ddot{U}(t)$ отримується шляхом числового диференціювання вейвлет образу сигналу $\tilde{U}(t)$ у відповідності до (17). Тобто, попередньо розрахувавши другу похідну модифікованої імпульсної перехідної функції (базисної функції), швидкодію методу визначатимуть здійснення арифметичних процедур відповідно до виразів (17), (21). Всі зазначені процедури легко реалізувати відомими пакетами MathCad чи MathLab тощо. Існують також засоби опрацювання сигналів з можливістю спеціального програмування, що орієнтовані на конкретну задачу.

Крім цього, зазначимо, що безмежні суми у виразі (17) необхідно буде замінити на скінченні, що впливатиме на точність обчислення значення вимірюваного тиску.

7. Обговорення методу вимірювання нестационарного тиску

Розроблений метод вимірювання передбачає використання вейвлет перетворення вихідного сигналу сенсора. Для підвищення точності вейвлет опрацювання у якості базисної функції вейвлет перетворення запропоновано використовувати модифіковану імпульсну перехідну функцію сенсора.

Однак, важливо розуміти, що попередньо необхідно мати імпульсну перехідну функцію сенсора. Її отримують експериментальними методами. Також експериментально отримують значення статичного коефіцієнта перетворення сенсора k , частоти власних коливань η і коефіцієнта демпфування коливань механічної частини сенсора β . Однак необхідно розуміти, що в процесі експлуатації сенсора можуть змінюватись фізико-механічні параметри мембрани. Це означає, що буде необхідно періодично перевіряти значення частоти її коливань, та статичного коефіцієнта перетворювання сенсора, а також піддавати перевірці його імпульсну перехідну функцію.

Крім цього, у експериментальному методі силової імітації імпульсу тиску необхідно забезпечити одноразовий удар кульки об мембрану, що потребуватиме спеціальних технічних рішень у самій спрямовуючій трубці.

Слід зауважити, що для реалізації методу необхідно тільки відповідне програмне забезпечення.

8. Висновки

1. В роботі показано, що основне рівняння вимірювання не матиме єдиного розв'язку, якщо Фур'є образ передавальної функції сенсора є фінітним, або ж в деяких точках перетворюється в нуль. Оскільки передавальні функції реальних сенсорів тиску практично завжди мають нулі, а довжина спектра вхідного сигналу в силу його нестационарності може бути довільно широкою, то при вимірюванні нестационарного тиску за отриманим реальним вихідним сигналом, вхідний сигнал (мета вимірювання) визначається неоднозначно, а отже вимірювання будуть некоректними.

2. Отриманий розв'язок оберненої задачі вимірювання, який представляє собою алгебраїчне рівняння з похідними вихідного сигналу сенсора. Для практичного втілення цього рівняння використовується вейвлет перетворення вихідного сигналу. В роботі показана можливість диференціювання вейвлет образу вихідного сигналу, що є основою розробленого методу вимірювання. При цьому у якості базисної функції вейвлет перетворення запропоновано використовувати модифіковану імпульсну перехідну функцію сенсора.

3. При експериментальних дослідженнях дієздатності розробленого методу вимірювання на установці силової імітації імпульсу тиску похибка визначення маси падаючої кульки, що імітувала імпульс тиску, склала 0,65 %. Такий результат підтверджує ефективність методу.

Отримані результати дослідження показують дієздатність розробленого методу вимірювання з вейвлет перетворенням сигналу і можливість його застосування у швидкодіючих системах автоматики з реальночасовим функціонуванням.

Література

1. MEMS for Automotive and Aerospace Applications / M. Kraft, N. M. White (Eds.). Woodhead Publishing Limited, 2013. doi: <https://doi.org/10.1533/9780857096487>
2. Маркелов И. Г. Комплекс датчиков давления для эксплуатации на объектах атомной энергетики // Датчики и системы. 2009. № 11. С. 24–25.
3. Custom Pressure Sensors for the Aerospace Industry. Merit Sensor. URL: <https://meritsensor.com>
4. Sensors for Aerospace & Defense. PCB Piezotronics. URL: <https://www.pcb.com/aerospace>
5. Hadamard J. Lectures on Cauchy's problem in linear partial differential equations. New York: Dover Publications, 1923. 338 p.
6. Тихонов А. Н., Арсенин В. Ю. Методы решения некоректных задач. 2-е изд. М.: Наука, 1979. 228 с.

7. Tikhonov A. N. Regularizing algorithms and prior information. Moscow: Nauka, 1983. 197 p.
8. Solopchenko G. N. Methods for taking into account the priori information in the correction of the measurement error in the measurement computation channel in the dynamic mode // Research in the field of evaluation of measurement errors: Digest of scientific proceedings VNIIM. Moscow, 1986. P. 27–31.
9. Burovtseva T. I., Zvyagintsev A. M. Correction of sensor error by the methods of fuzzy logic // Sensors and systems. 1999. Issue 7. P. 14–21.
10. Тихан М. О. Датчик динамічного тиску: Пат. № 75915 UA. № 2003109369; заявл. 17.10.2003; опубл. 15.06.2006, Бюл. № 6.
11. Шамраков А. Л. Перспективы развития пьезоэлектрических датчиков быстропеременных, импульсных и акустических давлений // Sensors & Systems. 2005. № 9.
12. Jin M., Li C. Non-Stationary Wind Pressure Prediction Based on A Hybrid Decomposition Algorithm of Wavelet Packet Decomposition and Variational Mode Decomposition // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 189. P. 052038. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/189/5/052038>
13. Application of non-stationary signal characteristics using wavelet packet transformation / Park S.-G., Sim H.-J., Lee H.-J., Oh J.-E. // Journal of Mechanical Science and Technology. 2008. Vol. 22, Issue 11. P. 2122–2133. doi: <https://doi.org/10.1007/s12206-007-1218-z>
14. Комиссаров А. А., Курочкин В. В., Семернин А. Н. Использование фильтра Калмана для фильтрации значений, получаемых с датчиков // Электронный сборник статей по материалам LIII студенческой международной заочной научно-практической конференции. Новосибирск, 2017. С. 166–170. URL: [https://sibac.info/archive/technic/5\(52\).pdf](https://sibac.info/archive/technic/5(52).pdf)
15. A novel method for nonstationary power spectral density estimation of cardiovascular pressure signals based on a Kalman filter with variable number of measurements / Zhang Z. G., Tsui K. M., Chan S. C., Lau W. Y., Aboy M. // Medical & Biological Engineering & Computing. 2008. Vol. 46, Issue 8. P. 789–797. doi: <https://doi.org/10.1007/s11517-008-0351-x>
16. Zhang J., Liu Q., Zhong Y. A Tire Pressure Monitoring System Based on Wireless Sensor Networks Technology // 2008 International Conference on Multi-Media and Information Technology. 2008. doi: <https://doi.org/10.1109/mmit.2008.177>
17. A Piezoresistive Micro Pressure Sensor Fabricated by Commercial DPDM CMOS Process / Yang L.-J., Lai C.-C., Dai C.-L., Chang P.-Z. // Tamkang Journal of Science and Engineering. 2005. Vol. 8, Issue 1. P. 67–73.
18. Kistler. Measure, analyze, innovate. URL: <https://www.kistler.com>
19. Selecting Piezoresistive vs. Piezoelectric Pressure Transducers / Carter S., Ned A., Chivers J., Bemis A. URL: https://www.kulite.com/assets/media/2018/01/Piezoresistive_vs_Piezoelectric.pdf
20. Vasylenko G. I. Theory of restoration of signals: About reduction to the ideal device in physics and technique. Moscow: Sov. Radio, 1979. 272 p.

21. Merry R. J. E. Wavelet theory and applications: a literature study. (DCT rapporten; Vol. 2005.053). Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2005.
22. Addison P. S. The Illustrated Wavelet Transform Handbook. CRC Press, 2002. 368 p. doi: <https://doi.org/10.1201/9781420033397>
23. Lee D. T. L., Yamamoto A. Wavelet Analysis: Theory and Applications // Hewlett-Packard. 1994. P. 44–52.
24. Tykhan M. Choice of parameters of calibrating signal for the receive of transient characteristic of pressures sensors // Sensors and systems. 2007. Issue 9. P. 17–19.